

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Володарский Александр Борисович

**Упругие свойства термопластического полимера
акрилонитрил-бутадиен-стирола и амплитудно-частотные
характеристики фононных кристаллов на его основе**

Специальность:

1.3.7. Акустика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в лаборатории акустической микроскопии Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук

Научный руководитель: **Мороков Егор Степанович,**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Карабутов Александр Алексеевич,**
доктор физико-математических наук, доцент,
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Научный центр волновых исследований, лаборатория лазерного ультразвука, ведущий научный сотрудник

Пожар Витольд Эдуардович,
доктор физико-математических наук,
Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, отдел акустооптических информационных систем, заведующий отделом

Прохоров Вячеслав Максимович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс Технологических исследований сверхтвердых и новых углеродных материалов, отделение структурных исследований, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится «25» ноября 2025 года в 16:30 на заседании диссертационного совета МГУ.013.6 на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, аудитория 4-28.

E-mail: kosareva@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (адрес: 119192, г. Москва, Ломоносовский проспект, д. 27) и в сети Интернет:
<https://dissovet.msu.ru/dissertation/3499>

Автореферат разослан «___» октября 2025 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.013.6,
доктор физико-математических наук, доцент



О.Г. Косарева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Акустические метаматериалы представляют собой класс искусственно созданных материалов, направленных на управление звуковыми и ультразвуковыми волнами: их передачу, улавливание или поглощение в определенном частотном диапазоне. Управление волнами может осуществляться за счет периодической структуры с изменяющимися параметрами. Подобные структуры носят название фононные кристаллы и активно применяются в фильтрах, поглотителях, акустических линзах и других ультразвуковых устройствах. Искусственно задаваемая периодическая структура фононного кристалла определяет его характеристики, в том числе отрицательный коэффициент преломления и обратное распространение волн, нулевой коэффициент преломления, запрещенные зоны в спектре излучения и сверхпоглощение. Размерность периодической структуры фононных кристаллов и свойства используемых для изготовления материалов определяют рабочий частотный диапазон ультразвука, но именно расположение и форма структурных неоднородностей определяют свойства конечного фононного кристалла.

Контролируемое распределение неоднородностей по объему метаматериала, а именно: их форма, размер и периодичность, возможно с применением аддитивных технологий изготовления, таких как 3D-печать с послойным наплавлением (Fused Deposition Modeling – FDM-метод). FDM-метод применяется для изготовления структур разной геометрии и формы, а одними из основных материалов, используемых при печати являются термопластичные полимеры. В отличие от реактопластов, термопласти благодаря ван-дер-вальсовым молекулярным связям могут многократно переплавляться. Данная особенность делает термопластичные полимеры перспективными материалами для формирования фононных кристаллов любой формы и размеров, однако упругие свойства полимера при переплавке могут изменяться и деградировать. Кроме того, свойства готового полимерного изделия варьируются в зависимости от методики печати, размера сопла, угла растра, температуры печати. Важной задачей стоит оценка упругих характеристик полимерных изделий в результате их формования.

Свойства и упругие характеристики полимерных образцов, изготовленных методом 3D-печати, могут существенно отличаться от свойств образцов, изготовленных методом литья или горячего прессования. Актуальным является не только оценка упругих и прочностных свойств термопластичных образцов в начальном состоянии, но и определение характеристик после температурного воздействия и послойного изготовления. Создание образцов с применением методик 3D-печати подразумевает послойное формирование зон наплавления полимерных

волокон, что влияет на распределение аморфных и кристаллических надмолекулярных областей по объему полимерного образца. Наличие мезомасштабной надмолекулярной структуры в 3D-напечатанных полимерных образцах приводит к появлению так называемой структурной (или неклассической) акустической нелинейности, которая обладает иными свойствами по сравнению с классической нелинейностью, обусловленной ангармонизмом сил межмолекулярного взаимодействия. Таким образом, востребованным оказывается определение не только линейных упругих свойств полимеров, таких как скорость ультразвуковых волн и модули упругости, но и нелинейных акустических параметров: модуль Юнга третьего порядка или коэффициент нелинейности.

Экспериментальные измерения нелинейных характеристик требуют применения комплексных методик, включающих квазистатическое механическое нагружение материала и ультразвуковые измерения значений скоростей распространения упругих волн. Ультразвуковые измерения проводятся в нагруженном объекте. При квазистатическом нагружении материалов в упругой области деформации из-за напряженно-деформированного состояния в материалах наблюдается так называемый акустоупругий эффект, основанный на изменении скорости распространения объемных упругих волн в деформируемом твердом теле. Акустоупругий эффект соотносит относительное изменение скорости волны вдоль прикладываемой нагрузки с напряжением и связывает упругие модули третьего порядка. При квазистатических деформациях полимеров акустоупругий эффект обладает двойственностью. Классическая линейная зависимость для ряда полукристаллических полимеров приобретает нелинейный характер зависимости относительного изменения скорости в направлении прикладываемой нагрузки от деформации. Экспериментальное изучение линейных и нелинейных параметров термопластичных полимеров является актуальной задачей, на решение которой направлена данная работа.

В качестве объекта для исследований был выбран термопластический полимер акрилонитрил-бутадиен-стирол (ABS), активно используемый для 3D-печати. Полимер обладает высокой химической стойкостью, твердостью и жесткостью, хорошим сопротивлением усталостным нагрузкам при достаточно высокой ударной вязкости и пластичности при низких температурах. Изучение упругих характеристик исходного полимера ABS и изменения свойств, связанные с формированием образцов методом 3D-печати, является важной задачей при оценке свойств напечатанных фононных кристаллов. Формирование фононных кристаллов с заданными геометрией, периодичностью и материалом заполнения открывает возможность получить определенные амплитудно-частотные характеристики, а именно: полосу пропускания или запрещенную зону. Характеристики, необходимые для прямого практического применения. Таким образом, тема представленной работы находится на пересечении задач современных

методов ультразвуковой диагностики, материаловедения и технологий аддитивного производства, что определяет ее научную и прикладную значимость.

Цель и задачи работы

Целью работы является выявление особенностей структуры и упругих свойств термопластичного полимера акрилонитрил-бутадиен-стирола при 3D-печати и характеристик фононных кристаллов на его основе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать экспериментальные методики исследования линейных и нелинейных упругих параметров полимеров в форме тонких цилиндров при статическом и квазистатическом механическом нагружении.
2. Исследовать влияние скорости нагружения на линейные и нелинейные упругие свойства образцов термопластического полимера ABS в форме тонких цилиндров.
3. Исследовать влияние 3D-печати на быструю динамику в полимерных ABS образцах.
4. Исследовать влияние геометрии и материала заполнения фононных кристаллов, напечатанных из полимера ABS, на амплитудно-частотные характеристики.

Объект и предмет исследования

Объектами исследования являются термопластический полимер акрилонитрил-бутадиен-стирола (ABS) и фононные кристаллы, изготовленные из полимера методом послойной 3D-печати.

Предметом исследования являются линейные и нелинейные упругие характеристики полимера ABS, зависимости упругих характеристик от напряженно-деформированного состояния полимерных образцов, скорости механического нагружения и 3D-печати; спектральные характеристики фононных кристаллов на основе полимера ABS при распространении продольных и поперечных ультразвуковых волн в диапазоне от 0.2 МГц до 3.0 МГц в зависимости от периодической структуры кристалла, материала заполнения и поляризации упругих волн.

Методология исследования

Проведенные в диссертации исследования основаны на известных результатах современных и классических работ, посвященных вопросам изучения упругих свойств полимерных материалов и проблемам распространения ультразвука в акустических метаматериалах. Для исследования механических характеристик и получения линейного

упругого параметра (модуля Юнга) использовался метод одноосного растяжения. Для нахождения нелинейного упругого параметра (нелинейный модуль Юнга) применялся квазистатический метод Терстона-Браггера, заключающийся в одновременном пропускании по образцу ультразвуковой волны с нагружением образца и расчету по характеристикам принятого сигнала свойств вещества.

Методы высокоточной (100 МГц) акустической микроскопии использовались для расчета скоростей ультразвуковых волн в образце и визуализации изменений структуры образца, возникающей при различных уровнях его механического нагружения. Для этого применялись программное обеспечение и аппаратные средства, разработанные и созданные в лаборатории акустической микроскопии ИБХФ РАН.

Исследования эффекта быстрой динамики производились методом нелинейной ультразвуковой спектроскопии с использованием ультразвукового приемно-передающего комплекса Ritec RAM-5000, включающего в себя генератор сигналов, усилитель и высокоскоростной АЦП для фиксации поступающих сигналов.

В работе исследовались две конструкции фононных кристаллов. Первый кристалл изготовлен из полимера ABS в форме цилиндра с периодическими цилиндрическими полостями, параллельными осями кристалла, и именуется в работе твердотельным фононным кристаллом. Конструкция второго кристалла представляла собой набор тонких перегородок из ABS, количество и толщина которых варьировалась. Средой распространения волн для второго кристалла выступали вода или agar, поэтому подобные кристаллы называются в работе жидкостными и вязкоупругими соответственно.

Изучение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фононных кристаллов проводилось эхо-импульсным методом в режиме на прохождение. Исследования проводились при распространении через кристаллы продольных и поперечных упругих волн. Для твердотельных фононных кристаллов измерения на продольных волнах в частотном диапазоне 1.5÷3.0 МГц проводились с поворотом кристалла вокруг своей оси на углы до 180°, что позволяло изменять геометрию кристалла. Для поперечных волн в диапазоне частот 0.2÷1.2 МГц анализ АЧХ проводился при повороте пьезопреобразователей, что обеспечило оценку влияния поворота плоскости поляризации поперечной волны на амплитуду прошедшей волны. Измерения для жидкостных и вязкоупругих кристаллов проводились продольными волнами с частотами 0.4÷1.5 МГц. Поворот кристалла вокруг собственной оси относительно нормального падения волн осуществлялся на угол 60° в обе стороны.

Научная новизна

1. Обнаружены и описаны зависимости нелинейного акустического параметра полимера ABS от скорости прикладываемой деформации растяжения.
2. Экспериментально обнаружен и описан эффект зарождения локальных областей микрометрового размера с уменьшенными упругими характеристиками при переходе аморфного полимера ABS из упругой в пластическую деформацию.
3. Впервые описан эффект быстрой динамики в полимере ABS, заключающийся в логарифмической зависимости относительного изменения скоростей продольных и поперечных волн от амплитуды накачки сигнала.
4. На основе измеренных амплитудно-частотных характеристик ABS фононных кристаллов с металлическим заполнением были выявлены особенности локализации запрещенных зон и полос пропускания для поперечных волн различной поляризации.

Практическая значимость работы

Полученные в работе экспериментальные данные позволяют установить корреляцию между внешними статическими и динамическими воздействиями (механическая нагрузка и амплитуда акустических волн) и измеряемыми линейными и нелинейными упругими параметрами 3D-напечатанных полимеров. Установленные закономерности будут полезны при неразрушающей диагностике 3D-напечатанных полимерных изделий, подвергающихся внешним механическим воздействиям.

Разработанную методику исследования быстрой динамики полимерных образцов можно применять при дефектоскопии и изучении анизотропии полимерных изделий.

Измеренные свойства твердотельного фононного кристалла показывают возможность создания на его основе аналогового полосового фильтра. Поворот кристалла вокруг своей оси обеспечивает фильтрацию продольных волн. Поворотом фононного кристалла вдоль направления распространения волн достигается фильтрация поперечных волн различной поляризации.

Положения, выносимые на защиту

1. Абсолютное значение нелинейного модуля Юнга и акустический нелинейный параметр термопластического полимера ABS увеличиваются в 1.3 раза при росте скорости механического растяжения.
2. Неравномерное распределение напряжений по объему полимерных ABS стержней при одноосном растяжении, приводит к неравномерному по длине снижению скорости

продольных упругих волн, распространяющихся вдоль и поперек оси нагружения. Локальное снижение скорости ультразвука с 2320 м/с до 2230 м/с соответствует пластически деформированным областям.

3. Относительное изменение скорости продольных волн от амплитуды накачки сигнала в образцах, сформованных методом 3D-печати, описывается нелинейной (логарифмической) зависимостью с коэффициентом $1.5 \cdot 10^{-3}$.

4. Положения разрешенных и запрещенных зон при распространении продольных волн через фононный кристалл связаны с периодичностью структуры, а не с типом материала заполнения.

5. Положение полос пропускания при распространении поперечных волн через фононный кристалл зависит от поляризации волн. Максимумы амплитуд прошедших волн достигаются при поляризации перпендикулярной оси симметрии фононного кристалла.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается проверочными численными моделями, описывающими распространение упругих волн через фононные кристаллы. Экспериментальные данные соответствуют теоретическим расчетам и результатам, полученным в работах других авторов.

Апробация работы

Результаты исследований, представленных в научно-квалификационной работе, докладывались и обсуждались на следующих профильных российских и международных конференциях: на XXVII и XXXII Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (г. Москва 10 - 27 ноября 2020 г., 11 - 25 апреля 2025 г.), на 3-й Всероссийской акустической конференции (г. Санкт-Петербург, 21 - 25 сентября 2020 г.), на 180-й сессии Американского акустического общества (виртуальная, США, 8 - 10 июня 2021 г.), на Международном ультразвуковом симпозиуме (IEEE IUS) (X'ian, Китай, 12 - 16 сентября 2021), на XXXIII и XXXIV Всероссийских школах-семинарах «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова (г. Можайск, 5 - 10 июня 2022 г., 28 мая - 2 июня 2023 г.) и обсуждались на научных семинарах кафедры акустики физического факультета МГУ и научно-технологического центра уникального приборостроения РАН.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19–12–00098).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы изложены в 5 печатных работах, в том числе 5 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова. Список работ автора приведен в конце диссертации перед списком литературы.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе экспериментальные результаты получены автором лично либо при его определяющем участии. Предлагаемые задачи и полученные результаты обсуждались совместно с научным руководителем.

Весь комплекс экспериментальных акустических исследований и их обработка были выполнены автором самостоятельно в Институте биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук (ИБХФ РАН) и на кафедре акустики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Анализ и интерпретация полученных данных проводились совместно с научным руководителем.

Непосредственно автором был написан оригинальный текст большинства публикаций по представленным в диссертационной работе результатам. Окончательная подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, а представление их в редакцию журналов и переписка с редакторами и рецензентами для подавляющего большинства статей осуществлялись автором самостоятельно. Вклад автора в научных трудах [A2–A5] составлял от 1 до 1/2; в научном труде [A1] от 1/2 до 1/3.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных результатов и выводов (заключения) и списка литературы. Общий объем работы составляет 117 страниц, 37 рисунков, 9 таблиц и 88 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении к научно-квалификационной работе обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость исследуемой проблемы, приводится краткий обзор литературы, сформулированы цели и задачи работы, а также описывается ее краткое содержание по главам.

Первая глава посвящена исследованию свойств термопластических полимеров в форме тонких цилиндров.

В §1.1 изложено теоретическое описание процессов, происходящих в тонком цилиндрическом стержне при распространении по нему упругой волны. Приведен вывод уравнений для фазовой и групповой скоростей акустической волны, распространяющейся в тонком цилиндре, и обоснована возможность считать в рассмотренном случае данные скорости равными.

Параграф §1.2 посвящен описанию экспериментальных установок, в том числе установки на основе ультразвукового автоматизированного комплекса Ritec (рис. 1) и сканирующего импульсного акустического микроскопа, а также экспериментальной ячейки и методик измерения, применяемых при исследовании свойств тонких цилиндрических образцов.

В работе для измерения упругих свойств применялись статический и квазистатический методы. В основе статического метода лежит измерение зависимости деформации образца ε от механического напряжения σ , прикладываемого к нему. При разложении в ряд Тейлора аналитической зависимости $\sigma(\varepsilon)$ в малой окрестности $\Delta\varepsilon$ вблизи деформации ε_0 :

$$\sigma(\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon) \approx E_{st}(\varepsilon_0) * \Delta\varepsilon + \frac{1}{2}E_{2st}(\varepsilon_0) * \Delta\varepsilon^2, \quad (1)$$

возникают модули Юнга, называемые статическими $E_{st}(\varepsilon_0) = \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}(\varepsilon_0)$, $E_{2st}(\varepsilon_0) = \frac{\partial^2\sigma}{\partial\varepsilon^2}(\varepsilon_0)$ соответственно второго и третьего порядка, называемые также линейный и нелинейный модули Юнга. Линейный модуль Юнга рассчитывался по углу наклона линейной части зависимости механического напряжения от деформации. Для получения значений нелинейного модуля Юнга применялся квазистатический метод (модифицированный метод Терстона-Браггера), который заключался в измерении зависимости относительного изменения скорости упругих волн в образце от величины приложенного к нему механического напряжения растяжения. По линейной части измеренной зависимости относительного изменения скорости от деформации и полученным значениям линейного модуля Юнга рассчитывался нелинейный модуль Юнга:

$$E_{2st} = \frac{2E_{st}}{\Delta\varepsilon_{ct}} \left(\frac{\Delta V}{V} \right), \quad (2)$$

где E_{st} – линейный модуль Юнга, $\Delta\varepsilon_{ct}$ – величина деформации, V – скорость распространения волны по образцу, ΔV – изменение скорости волны.

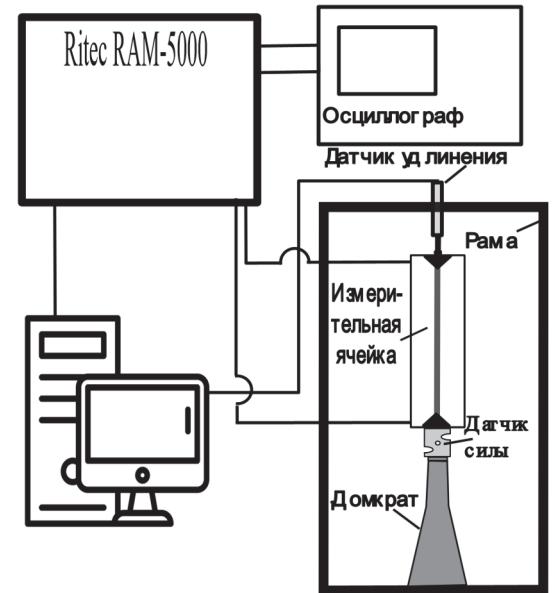


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования акустических параметров образцов полимеров в форме тонких цилиндов.

Для характеристики нелинейности образца использовался акустический нелинейный параметр, взятый как отношение нелинейного и линейного модулей Юнга.

Ультразвуковая визуализация объемной микроструктуры полимеров и расчет значений локальных скоростей продольных волн вдоль и поперек оси нагружения, после снятия нагрузки, проводился с помощью сканирующего импульсного акустического микроскопа СИАМ-2011 (рис. 2), разработанного и созданного в лаборатории акустической микроскопии института биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН.

В §1.3 приведены характеристики исследуемого материала, представлен обзор механических и упругих характеристик полимера, приведены краткие результаты предшествующих работ, посвященных изучению линейных и нелинейных свойств акрилонитрил-бутадиен-стирола и других полимеров.

В параграфе §1.4 приводятся результаты экспериментальных исследований тонких цилиндрических образцов полимеров ABS. Представлены результаты исследования влияния скорости нагружения на линейные и нелинейные упругие свойства. Показано, что увеличение скорости деформации в 1.6 раза не изменяет значений линейного модуля Юнга, но приводит к росту по модулю значений нелинейного модуля Юнга и акустического нелинейного параметра термопластического полимера ABS, которые увеличиваются в 1.3 раза при росте скорости механического растяжения.

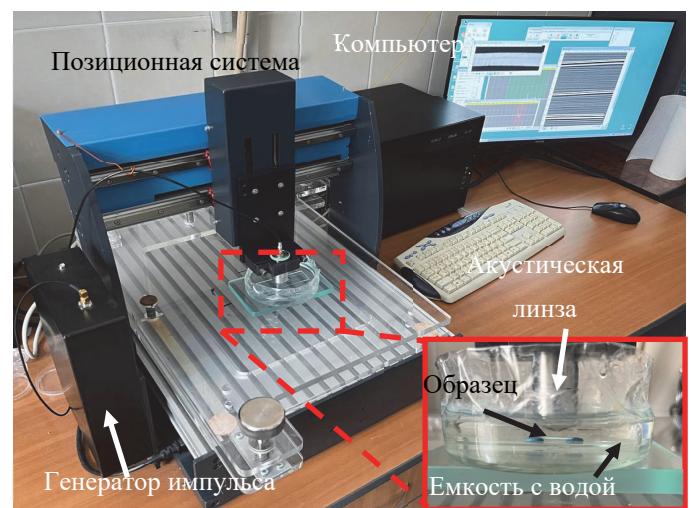


Рис. 2. Сканирующий импульсный акустический микроскоп.

Таблица 1 — Рассчитанные значения линейных и нелинейных упругих параметров для различных скоростей деформации образцов.

Скорость деформации, 10^{-6} с^{-1}	2.8	4.6
Модуль Юнга, ГПа	2.75 ± 0.07	2.72 ± 0.07
Нелинейный модуль Юнга, ГПа	-6.9 ± 0.3	-9.8 ± 0.5
Нелинейный акустический параметр	2.5 ± 0.1	3.6 ± 0.2

Представлены результаты ультразвуковой визуализации объемной микроструктуры полимера в процессе механического нагружения (рис. 3), отображены изменения структуры при переходе из упругой в пластическую область. Исследован процесс перехода полимера ABS из упругой в пластическую область. Выявлены и локализованы области нарушений сплошности микроструктуры, повлекшие к снижению упругих характеристик. Локальное снижение скорости ультразвука с 2320 м/с до 2230 м/с соответствует пластически деформированным областям в объеме полимера. Показана неравномерная локализация областей с уменьшенными упругими характеристиками при растяжении цилиндрических полимерных образцов.

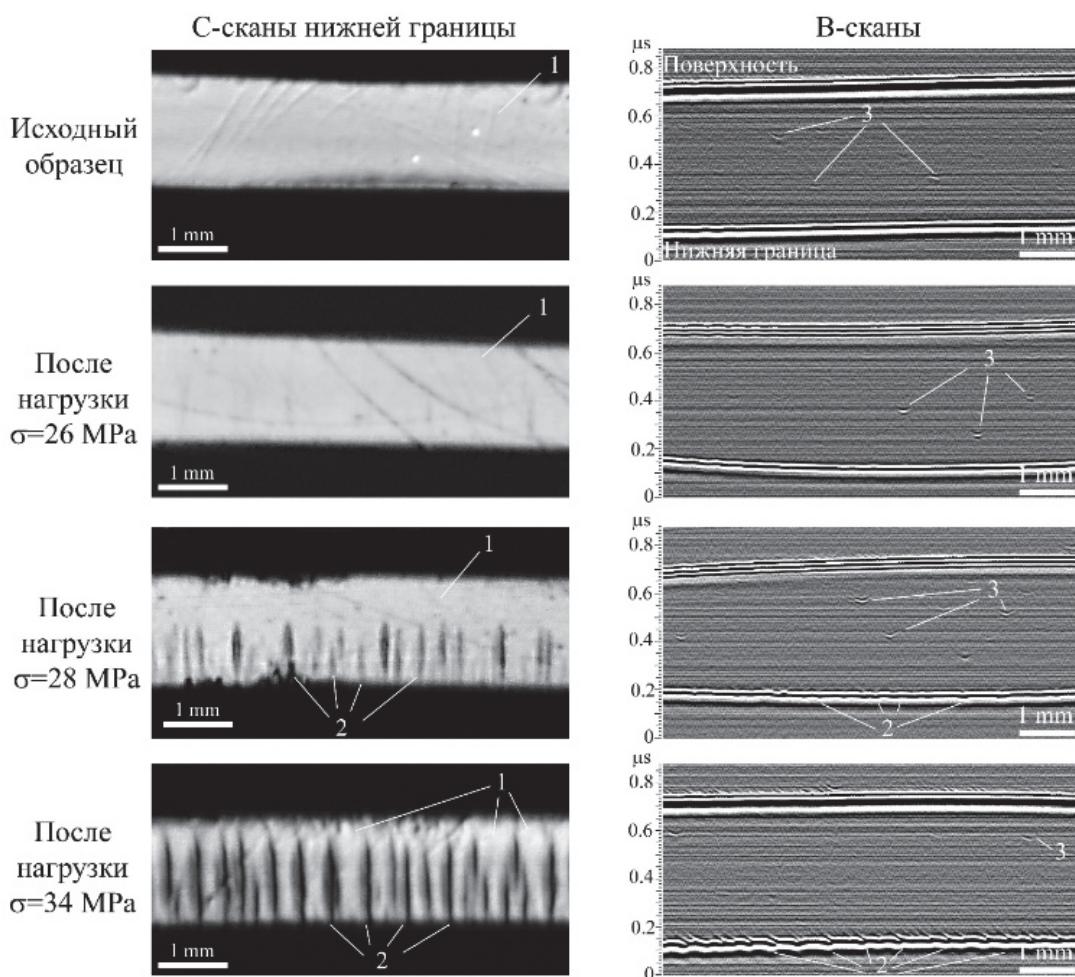


Рис. 3. Акустические изображения образцов ABS после разного уровня нагружения. 1 – области с первоначальной структурой; 2 – области с разряженной структурой; 3 – поры.

Изучено влияние процесса 3D-печати на механические и акустические характеристики полимера при циклическом режиме нагрузка-разгрузка. Получены зависимости величины напряжения от деформации (рис. 4). Показано, что процесс 3D-печати не оказывает существенного воздействия на линейные упругие характеристики (значения линейного модуля Юнга обоих образцов равны в рамках погрешности на всех этапах нагрузки-разгрузки), но повышает величину нелинейности полимера. Линейный модуль Юнга как для полимера,

полученного методом 3D-печати, так и для не подвергавшегося обработке изменялся от 2 ГПа до 2.5 ГПа при циклическом режиме нагрузки-разгрузки. Нелинейный модуль Юнга полимера, не подвергавшегося обработке, находился в диапазоне от -4.1 ГПа до -5.7 ГПа, тогда как для образца, полученного методом 3D-печати, диапазон был шире от -3.8 ГПа до -7.4 ГПа. Повторяющаяся нагрузка приводит к понижению величины нелинейного акустического параметра для 3D-напечатанного образца с 3.3 до 2.4, для ABS, не подвергавшегося дополнительной обработке, значения нелинейного акустического параметра остаются близкими к 2.1 для всех этапов нагрузки-разгрузки.

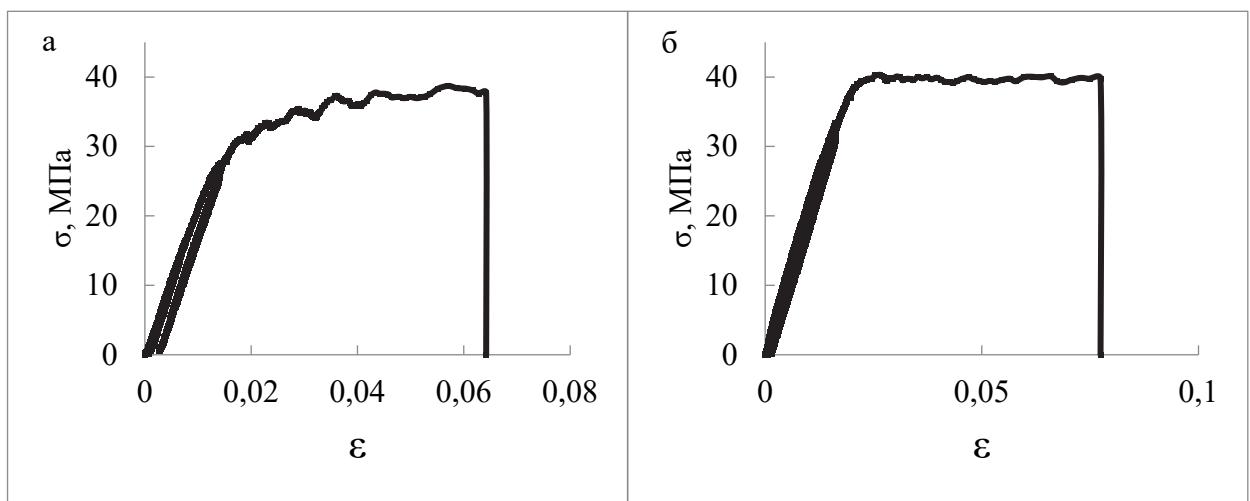


Рис. 4. Экспериментально измеренная нагрузочная кривая $\sigma(\varepsilon)$ для: а) исходного и б) 3D-напечатанного образцов ABS.

В §1.5 представлены выводы к первой главе.

Вторая глава посвящена исследованию особенностей возникновения эффекта быстрой динамики для продольных и поперечных волн в образце полимера ABS, полученном методом 3D-печати. Показана зависимость скорости волны от амплитуды накачки, продемонстрирована нелинейная зависимость амплитуды принимаемого сигнала от амплитуды посыпанного.

В §2.1 перечислены механизмы возникновения при 3D-печати структурной нелинейности, которая может приводить к нелинейным упругим эффектам, одним из которых является эффект быстрой динамики. Он заключается в наличии зависимости скорости и амплитуды проходящей упругой волны от амплитуды волны накачки.

Экспериментальное оборудование и параметры акустических волн, использующихся в эксперименте, представлены в §2.2. Показано, что во всем диапазоне частот длины волн превосходят размеры волокон полимера при 3D-печати (для продольных волн в 3.8 – 6.8 раз, для поперечных в 1.8 – 3.3).

В параграфе §2.3 приводятся результаты исследования быстрой динамики для образца кубической формы, произведенного методом 3D-печати из полимера ABS. Получены зависимости относительных изменений скорости от амплитуды накачки для продольных волн с тремя различными направлениями распространения (вдоль осей X, Y и Z образца) и для поперечных волн с тремя различными направлениями распространения и двумя плоскостями поляризации волны для каждого направления. Все полученные зависимости имеют логарифмический характер:

$$\frac{\Delta V}{V}(A_H) = -a \cdot \ln(A_H) + \text{Const.} \quad (3)$$

На рисунке 5а приведен типичный вид зависимостей относительного изменения скорости от амплитуды накачки. Анализ нелинейности проводился путем нахождения коэффициента a , существенных различий которого не обнаружено (согласно критерию Стьюдента с доверительным интервалом 0.95, рис. 5б). Эквивалентные данные коэффициента отображают изотропность изменений $\Delta V/V$ и, соответственно, изотропность изменений продольного модуля упругости по всем направлениям.

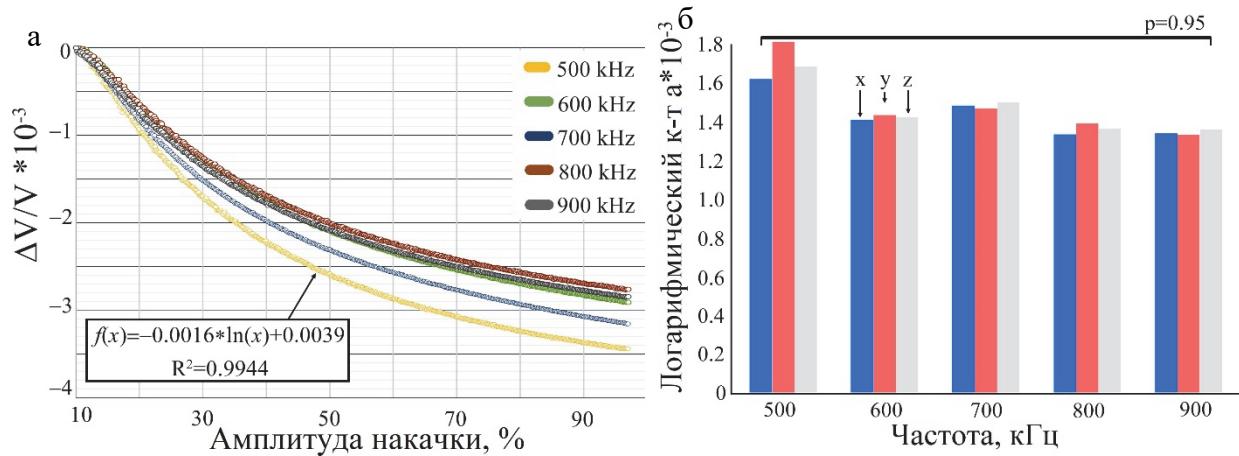


Рис. 5. (а) Зависимости $\Delta V/V$ от амплитуды накачки продольных волн вдоль оси X. (б) Значения логарифмических коэффициентов a , полученные для продольных волн, распространяющихся вдоль осей X, Y и Z.

Для амплитуд прошедших волн получены степенные зависимости от амплитуд накачки:

$$A_{\text{Пр}} = C * A_H^d, \quad (4)$$

где C — составляющая электромеханических преобразований, а d — коэффициент степенной функции. Отклонение от линейности и, соответственно, отличие коэффициента d от единицы отражают влияние внутренней структуры на распространение упругих волн. Установлена эквивалентность данных по большинству направлений с доверительным интервалом 0.95. Различия наблюдались при распространении волн типов X(Y) и Z(X), где зависимости на высоких частотах были близкие к линейным. Тем не менее, наблюдалось нелинейное поведение амплитуды $A_{\text{Пр}}$ прошедшей поперечной волны, что отражает качественные изменения сдвиговых упругих

свойств. Близкие значения коэффициента d показывают изотропность динамики сдвиговой волны в образце. Полученные результаты позволяют выдвинуть предположение, что применяемый способ печати не вносит сильных изменений в характеристики аморфного полимера ABS и сочетание материала и методики формования позволяют изготавливать фононные кристаллы заданной геометрии и наполнением. Выводы ко второй главе изложены в §2.4.

Третья глава посвящена изучению фононных кристаллов, произведенных методом 3D-печати из полимера ABS. Рассматриваются две принципиально различных конструкции фононных кристаллов: кристалл с твердотельной матрицей и кристалл с жидкой или вязкоупругой матрицей.

§3.1 представлен обзор литературы по теме “Фононные кристаллы”, в нем приводится краткая историческая справка и объяснение некоторых возникающих в фононных кристаллах явлений.

Результаты исследований фононных кристаллов с твердотельной матрицей в форме цилиндра с регулярными цилиндрическими полостями представлены в §3.2. Кристаллы были произведены из ABS методом 3D-печати. Рассмотрены два кристалла: с воздушным и со стальным заполнением цилиндрических полостей. При помощи эхо-импульсной методики на прохождение измерены АЧХ для продольных волн. Измерения проводились с углами поворота кристалла вокруг своей оси (от 0° до 180° с шагом в 3°) относительно направления распространения волны. Результаты измерений с углами поворота от 0° до 90° для фононного кристалла с воздушным заполнением полостей представлены на рисунке 6а. Амплитудно-частотная характеристика сильно изрезана, значительное затухание продольных ультразвуковых волн наблюдается вблизи частот 1.58 МГц, 1.97 МГц и в полосе от 2.62 до 2.85 МГц. Запрещенные частоты и частоты полос пропускания совпадают для всех углов поворота образца. Амплитуды принимаемых сигналов различаются, причем нельзя выделить какое-то одно направление, на котором амплитуда на всем диапазоне частот выше. Таким образом изменение угла поворота образца относительно распространения продольной волны позволяет уменьшать величину принимаемого сигнала, не меняя частоты, в два раза. Наименьшие значения амплитуд прошедших сигналов наблюдаются при повороте фононного кристалла на 45° . Измеренные свойства твердотельного фононного кристалла показывают возможность создания на его основе аналогового полосового фильтра. Поворот кристалла вокруг своей оси обеспечивает фильтрацию продольных волн.

Показано, что при распространении продольных волн в диапазоне частот от 1.5 МГц до 3 МГц для фононного кристалла с матрицей из ABS картина наблюдаемых полос пропускания и непропускания не зависит от материала заполнения, кроме области вблизи 2.07 МГц (рис. 6б).

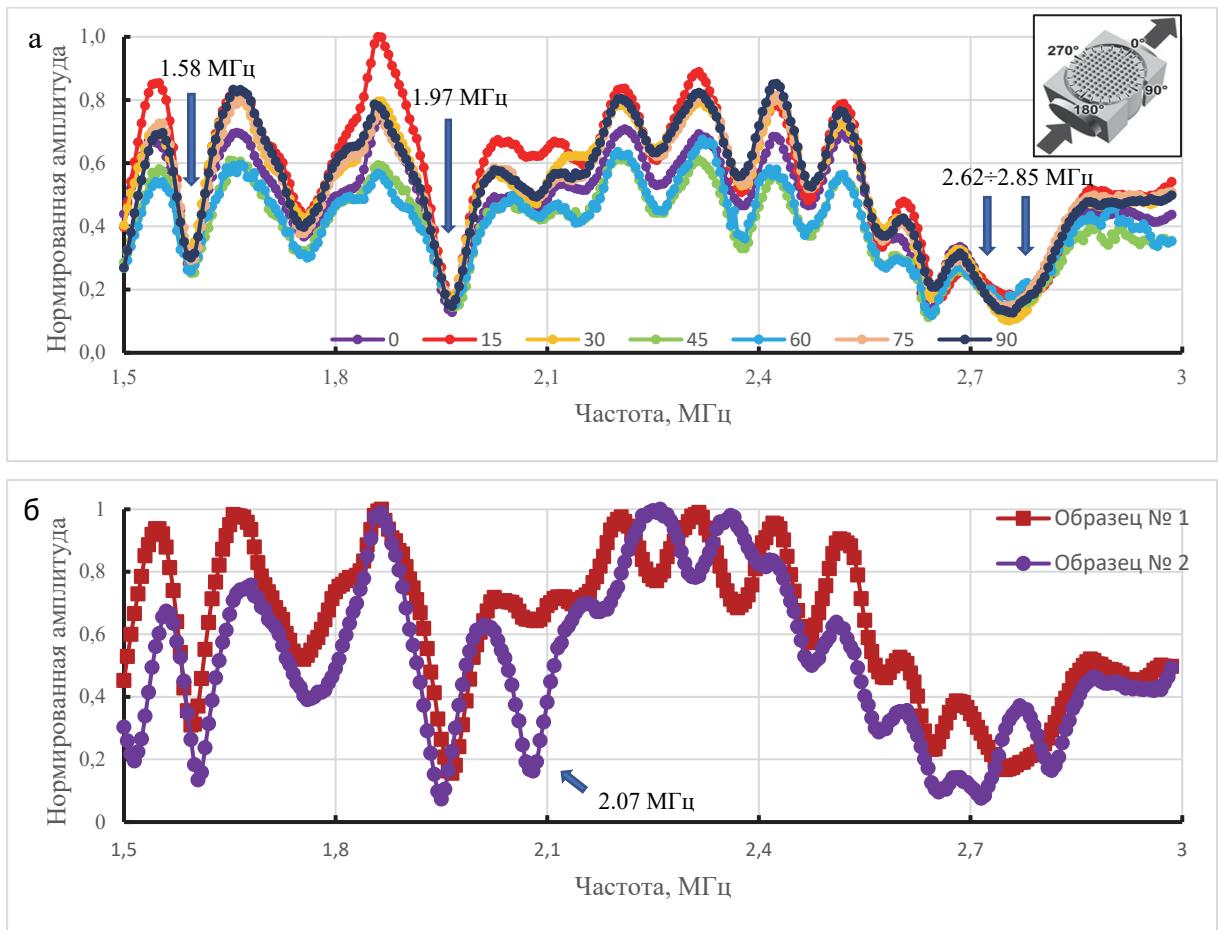


Рис. 6. (а) Серия АЧХ для образца с воздушным заполнением полостей при углах $0^\circ \div 90^\circ$ направления распространения продольной волны относительно положения образца, принятого за начальное (б) АЧХ для образцов № 1 (с воздушным заполнением) и № 2 (с металлическим заполнением) при угле $\alpha=135^\circ$ направления распространения продольной волны относительно положения образца, принятого за начальное.

Измерения, проведенные эхо-импульсным методом, с применением поперечных волн с частотами от 0.2 до 1.2 МГц показывают, что на прохождение волны существенное влияние оказывает угол между плоскостью поляризации волны и осью кристалла (рис. 7). Максимумы амплитуд прошедших волн достигаются при поляризации, перпендикулярной оси симметрии фононного кристалла. Данная особенность распространения волн позволяет рассматривать исследуемые фононные кристаллы в качестве потенциальных поляризационных фильтров.

В §3.3 рассмотрены фононные кристаллы с жидкой и вязкоупругой матрицами, для которых ABS является материалом включений. Описаны использованные экспериментальные установки и изложены результаты прохождения ультразвуковых продольных волн с частотами 0.4 – 1.5 МГц через фононные кристаллы. Данные кристаллы представляли собой набор из решеток, зафиксированных в коробе. Использовались решетки шириной 0.4 мм и 0.8 мм с периодами 1.4 мм

и 2.8 мм соответственно. Толщина решетки равнялась ее ширине, поэтому решеток с периодом 2.8 мм в коробе можно было зафиксировать от 1 до 5, а с периодом 1.4 мм от 1 до 9.

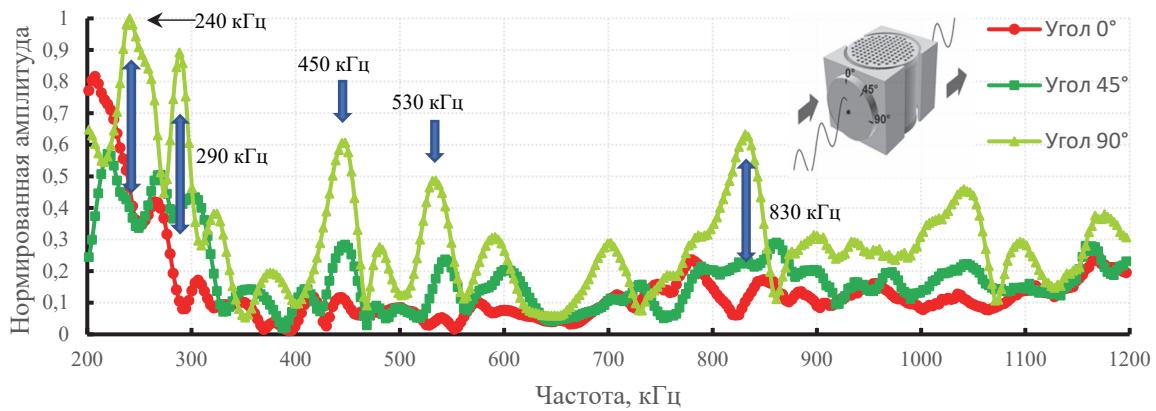


Рис. 7. Нормированная амплитудно-частотная характеристика образца твердотельного фононного кристалла с полостями, заполненными металлическими круглыми цилиндрами при различной ориентации вектора поляризации поперечной ультразвуковой волны.

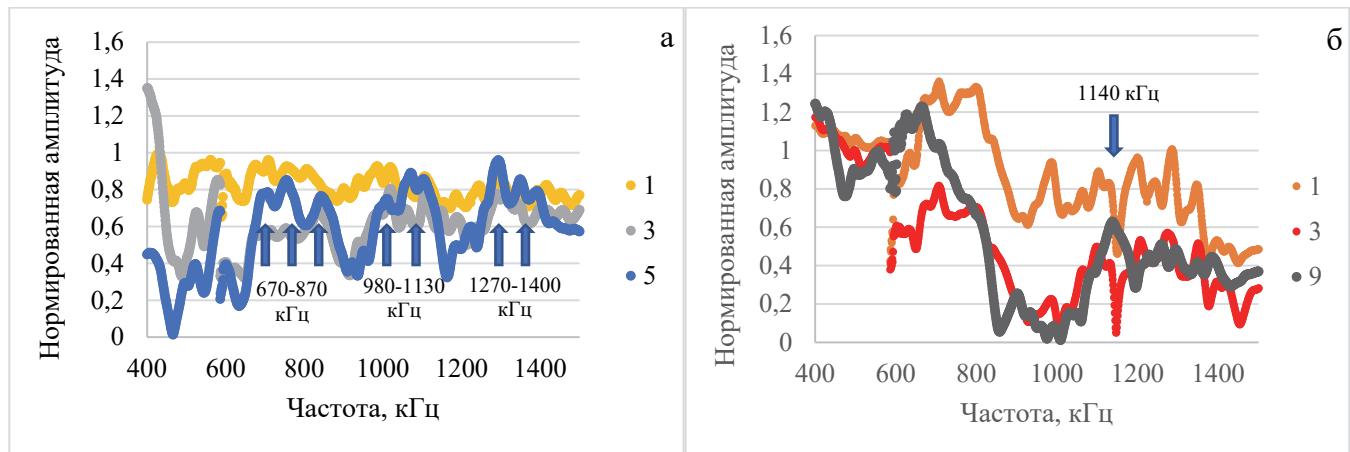


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики образцов жидкостных фононных кристаллов с шириной периодических препятствий а) 0.8 мм, б) 0.4 мм при различных количествах решеток.

Исследования амплитудно-частотных характеристик жидкостных фононных кристаллов показали снижение амплитуды прошедшего сигнала при увеличении количества слоев препятствий. На рисунке 8а приведены АЧХ для фононного кристалла с периодом решетки 2.8 мм и с 1, 3 или 5 слоями решетки. На рисунке 8б приведены АЧХ для фононного кристалла с периодом решетки 1.4 мм и с 1, 3 или 9 слоями решетки. Для обоих фононных кристаллов с ростом числа слоев решетки наблюдается снижение амплитуд прошедших волн. Но выделяются области, отмеченные на рисунке стрелками, в которых снижение амплитуды ниже, что связывается с резонансом

структуры кристалла. Схожая картина АЧХ наблюдалась и для фононных кристаллов аналогичной конструкции, помещенных в вязкоупругую среду (агар). Таким образом, фононные кристаллы схожей слоистой конструкции можно рекомендовать в качестве механически управляемого полосового фильтра.

Помимо измерения амплитудно-частотных характеристик были получены зависимости амплитуды прошедшей волны от угла поворота фононного кристалла для частот 526 кГц и 712 кГц (рис. 9). Углы между нормалью к решеткам и направлением распространения волны изменялись в диапазоне от -60° до 60° . Результаты соответствуют дифракции плоской волны на решетке и косвенно подтверждают корректность применяемого метода измерений. В §3.4 представлены выводы к третьей главе.

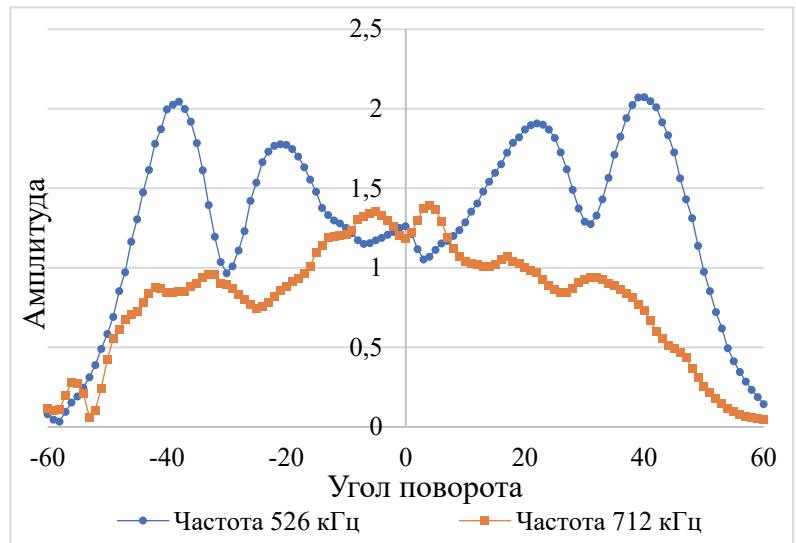


Рис. 9. Зависимость амплитуды прошедшей волны от угла поворота фононного кристалла с периодом 2.8 мм и 5 слоями.

В **Заключении** приводятся основные результаты и выводы работы. В конце работы приводятся списки публикаций автора и цитированной литературы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках диссертационной работы были исследованы и описаны особенности упругих характеристик термопластичного полимера акрилонитрил-бутадиен-стирола в зависимости от его структурных изменений под действием механических нагрузок и при формировании образцов методом 3D-печати. Впервые были исследованы нелинейные упругие свойства полимера, такие как Модуль Юнга третьего порядка и нелинейный акустический параметр. Экспериментально обнаружены и описаны эффекты зарождения и роста локальных областей с пониженными упругими характеристиками полимера при переходе полимера от упругой деформации к пластической. Изучение свойств термопластичных полимеров является важным аспектом при проектировании и прогнозировании свойств изделий, изготовленных методом послойной 3D-печати. Проведенный в работе экспериментальный анализ влияния процесса формования образцов из полимера ABS на упругие характеристики выявил особенности эффекта быстрой динамики,

заключающиеся в логарифмической зависимости относительного изменения скоростей продольных и поперечных волн от амплитуды накачки сигнала. На основе исследованного термопластического полимера ABS были созданы фононные кристаллы с заданными геометрией и пространственной структурой. В работе рассмотрены 4 вида кристаллов, для каждого из которых измерены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и выявлены особенности распространения продольных и поперечных волн. Основываясь на особенностях АЧХ, были выдвинуты предположения о применимости фононных кристаллов со схожими конструкциями в качестве полосовых фильтров или поляризационных фильтров. Основные результаты диссертации могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработаны экспериментальные методики исследования линейных и нелинейных упругих параметров полимеров в форме тонких цилиндров при квазистатическом механическом нагружении. Показано, что процесс 3D-печати не оказывает существенного воздействия на линейные упругие характеристики полимера ABS, значения модуля Юнга варьировались от 2 ГПа до 2.5 ГПа. Показано, что 3D-печать образцов повышает величину нелинейности на 65 %.

2. Обнаружено влияние скорости нагружения на нелинейные упругие свойства образцов термопластического полимера ABS в форме тонких цилиндров. Показано, что при увеличении скорости деформации в 1.6 раз нелинейный акустический параметр возрастает в 1.44 раза. Нелинейный модуль Юнга увеличивается по модулю в 1.3 раза при росте скорости механического растяжения. Высокая скорость нагружения приводит к раннему переходу от упругой к пластической деформации.

3. Исследован процесс перехода полимера ABS из упругой в пластическую область. Выявлены и локализованы области нарушений сплошности микроструктуры, повлекшие к снижению упругих характеристик. Локальное снижение скорости ультразвука с 2320 м/с до 2230 м/с соответствует пластически деформированным областям в объеме полимера. Показана неравномерная локализация областей с уменьшенными упругими характеристиками при растяжении цилиндрических полимерных образцов.

4. Исследовано влияние 3D-печати на эффект быстрой динамики в кубическом образце ABS полимера. Выявлено, что относительное изменение скорости продольных волн от амплитуды накачки сигнала в образцах, сформованных методом 3D-печати, описывается нелинейной, логарифмической зависимостью с коэффициентом $1.5 \cdot 10^{-3}$. Показано отсутствие зависимости эффекта быстрой динамики от направления распространения волн, что связано с равномерным распределением структурной неоднородности в образцах при 3D-печати.

5. Выявлено влияние геометрии и материала заполнения фононных кристаллов, напечатанных из полимера ABS, на амплитудно-частотные характеристики. Показано, что при распространении продольных волн в диапазоне от 1.5 МГц до 3 МГц для фононного кристалла с

матрицей из ABS картина наблюдаемых полос пропускания и непропускания не зависит от материала заполнения. Отмечено, что на распространение поперечных волн с частотами от 0,2 МГц до 1,2 МГц существенное влияние оказывает поворот плоскости поляризации относительно оси кристалла. Максимумы амплитуд прошедших волн достигаются при поляризации, перпендикулярной оси симметрии фононного кристалла. Данная особенность распространения волн позволяет рассматривать исследуемые фононные кристаллы в качестве потенциальных поляризационных фильтров.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих

Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

- A1. Shirgina N.V., Kokshayskiy A.I., **Volodarsky A.B.**, Odina N.I., Korobov A.I. *Features of amplitude frequency characteristics of ABS plastic 3D printed metamaterial sample* // Journal of Physics: Conference Series, 2021, Vol. 1765, P. 012027. Импакт-фактор 1,3 (SJR). EDN: DCJPDT. Общий объем статьи = 0,5 п.л.; личный вклад = 0,17 п.л.
- A2. **Володарский А.Б.**, Кокшайский А.И., Одина Н.И., Коробов А.И., Михалев Е.С. *Влияние 3D-печати на упругие свойства нитевидных образцов полимера ABS* // Акустический журнал, 2024, Т. 70, № 2, С. 167–173. Импакт-фактор 1,854 (РИНЦ). EDN: YNVOGY. Общий объем статьи = 0,88 п.л.; личный вклад = 0,53 п.л.
- Переводная версия: **Volodarskii A.B.**, Kokshaikii A.I., Odina N.I., Korobov A.I., Mikhalev E.S. *Effect of 3D-printing on the elastic properties of filament ABS polymer specimens* // Acoustical Physics, 2024, Vol. 70, No. 2, P. 236–241. Импакт-фактор 0,9 (JIF). EDN: GKYCCK. Общий объем статьи = 0,88 п.л.; личный вклад = 0,53 п.л.
- A3. **Володарский А.Б.**, Мороков Е.С., Кокшайский А.И., Одина Н.И., Коробов А.И. *Влияние растягивающих деформаций на распространение продольных упругих волн в объеме аморфного полимера* // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2025, Т. 121, № 6, С. 491–495. Импакт-фактор 0,624 (РИНЦ). EDN: MJCSST. Общий объем статьи = 0,63 п.л.; личный вклад = 0,42 п.л.

- Переводная версия: **Volodarsky A.B.**, Morokov E.S., Kokshaysky A.I., Odina N.I., Korobov A.I. *Effect of the tensile strain on the propagation of longitudinal elastic waves in the volume of an amorphous polymer* // JETP Letters, 2025, Vol. 121, No. 6, P. 469–473. Импакт-фактор 1,4 (JIF). EDN: KSNBBQ. Общий объем статьи = 0,63 п.л.; личный вклад = 0,42 п.л.

- A4. **Volodarskii A.**, Morokov E., Odina N., Kokshaikii A., Korobov A. *Fast shear wave dynamics of a 3D-printed acrylonitrile-butadiene-styrene sample* // Russian Physics Journal, 2025, Vol. 68, No. 3, P. 408–413. Импакт-фактор 0,4 (JIF). DOI: 10.1007/s11182-025-03447-7. Общий объем статьи = 0,81 п.л.; личный вклад = 0,41 п.л.
- A5. Korobov A., Shirgina N., Kokshaikii A., Odina N., **Volodarskii A.** *Experimental investigation of bulk elastic wave propagation in the volume of metamaterials* // Acoustics, 2025, Vol. 7, No. 3, P. 40. Импакт-фактор 1,2 (JIF). DOI: 10.3390/acoustics7030040. Общий объем статьи = 1,5 п.л.; личный вклад = 0,83 п.л.